



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **A search for transient reductions in the inflaton speed of sound in cosmological data, and other topics**

Torrado Cacho, J.

### **Citation**

Torrado Cacho, J. (2015, March 31). *A search for transient reductions in the inflaton speed of sound in cosmological data, and other topics*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/32593>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/32593>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32593> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Torrado Cacho, Jesús

**Title:** A search for transient reductions in the speed of sound of the inflaton in cosmological data, and other topics

**Issue Date:** 2015-03-31

# Samenvatting

## Part I

Wanneer de elektromagnetische straling van het hemelgewelf wordt waargenomen aan de hand van microgolven, dan is een milde achtergrondstraling zichtbaar die praktisch constant is in alle richtingen (zodra de grootste bijdragen van de voorgrond verwijderd zijn, zoals de straling die uit ons eigen melkwegstelsel komt). Waar komt deze straling vandaan? Waar vindt het zijn oorsprong? Toen wetenschappers de huidige kosmologische data probeerden te beschrijven met algemene relativiteitstheorie bleek in de vroeg-twintigste eeuw dat het universum zich tijdens haar gehele levensduur heeft uitgebreid (en dat nog steeds doet). Net zoals een gas heet wordt wanneer het samengeperst wordt, moet het universum in het verleden ook veel heter zijn geweest. Zo heet, dat op een gegeven moment de elektronen zoveel energie hadden dat zij liever gescheiden waren van de atoomkernen, vrijuit stromend en verstrooiend met fotonen, om een zogenaamd *plasma* te vormen. Toen deze energie door de groei van het universum verdund was geraakt, combineerden de elektronen met de kernen om atomen te vormen en waren de fotonen vrij om te reizen door de ruimte en ons te bereiken. Het zijn deze fotonen die de achtergrondstraling vormen die wij vandaag de dag waar kunnen nemen, datgene dat wij de Kosmische Achtergrondstraling noemen (Cosmic Microwave Background, CMB).

Wanneer men de CMB zorgvuldig waarneemt, is het eerste kenmerk dat zich toont hoe opvallend constant de straling is, bekeken over het gehele hemelgewelf. Dit is zeker niet wat we zouden verwachten. Aan de ene kant, het feit dat twee regio's van het universum praktisch hetzelfde signaal uitstralen is een indicatie dat zij in *evenwicht* zijn – de hete en koude regio's hebben energie met elkaar uitgewisseld totdat zij dezelfde temperatuur hadden bereikt. Aan de andere kant, volgens de snelheid waarmee ons universum uitdijt in ons kosmologische model zouden de regio's die meer dan een paar graden op het hemelgewelf van elkaar verwijderd zijn zo ver uit elkaar staan dat zij nooit tijd hebben gehad om energie uit te wisselen, ook niet aan het begin van het ontstaan van het universum. Dus hoe kunnen zij dan in evenwicht zijn?

Deze tegenspraak was in de jaren 80 opgelost met een cruciale aanpassing van het kosmologische model: we nemen aan dat in de eerste ogenblikken van het

bestaan van het universum, deze een explosief versnellende (bijna exponentiele) expansie heeft doorgemaakt. Een dergelijke expansie zou een klein stukje met een bijna constante temperatuur opblazen tot een regio die groter is dan dat deel van het universum dat wij vandaag de dag kunnen zien. Daarom is het zo dat datgene dat nu in het universum ver van elkaar verwijderd is, zo dichtbij elkaar stond in het verleden dat er bijna geen verschil in temperatuur was tussen deze twee punten. Deze periode van explosieve expansie heet *inflatie*.

Naast het feit dat de CMB het grootste bewijs is voor het bestaan van inflatie, bevat deze ook de meeste informatie over inflatie die we op dit moment hebben. Deze informatie kan gevonden worden in de extreem kleine fluctuaties van de CMB, tien duizend keer kleiner dan de bijna constante temperatuur van de achtergrondstraling zelf. Zulke fluctuaties zijn ontstaan toen de explosieve expansie de kleine, willekeurige kwantumfluctuaties op de kleine schaallengte heeft omgevormd tot dichtheidsverschillen in de materie die verdeeld zijn over grote afstanden in de kosmos. Als de fluctuaties, die we vandaag waarnemen, hun oorsprong vinden in kleine afstanden, dan moeten ze wel aan elkaar gerelateerd of *gecorruleerd* zijn. Het gemiddelde van temperatuurverschillen over de hele hemel, tussen paren van punten die op een bepaalde hoek van elkaar staan aan de hemel, is karakteristiek voor de correlatie tussen deze fluctuaties. Dit gemiddelde als functie van de hoek tussen de punten, heet de *twee-puntsrelatie* of het *vermogenspectrum*. Als de fluctuaties volledig willekeurig en ongecorruleerd waren geweest omdat ze hun oorsprong wijd uiteen vonden, in plaats van op kleine afstanden, dan zou dit gemiddelde op nul uitkomen. In plaats van nul, zijn deze fluctuaties relatief groot, en hun precieze eigenschappen kunnen ons veel vertellen over de quantumoorsprong van de fluctuaties.

Op het moment van schrijven van dit proefschrift, heeft de Planckmissie van de European Space Agency (ESA) zijn eerste gegevens beschikbaar gesteld, en we wachten op de volgende en definitieve vrijgave van alle gegevens. Deze gegevens bevatten een zeer nauwkeurige meting van de twee-puntsrelatie van de fluctuaties in de achtergrondstraling en deze meting is in overeenstemming met de uitkomsten van voorgaande experimenten. Bovendien verwacht men dat de volgende vrijgave van gegevens ook een meting van de drie-puntsrelatie ofwel het *bispectrum* zal bevatten. Het bispectrum is een gemiddelde van de correlaties tussen drie punten op vaste afstanden van elkaar over de hele hemel, in plaats van twee. De drie-puntsrelatie is nog niet eerder met voldoende precisie gemeten en is van cruciaal belang voor het bestuderen van inflatie, omdat inflatie een specifieke voorspelling geeft voor drie-puntsrelatie: als inflatie door het eenvoudigste model beschreven wordt, dan is de drie-puntsrelatie naar verwachting nagenoeg nul. Die houdt in dat de fluctuaties Gaussisch verdeeld zijn. Andere gecompliceerdere modellen van inflatie voorspelen uiteenlopende maar specifieke drie-puntsrelaties. Nu is gezegd het uur U om uitbreidingen van het simpelste raamwerk van inflatie te testen.

In het simpelste model van inflatie wordt de explosieve uitdijing van het heelal veroorzaakt door één enkel type *materie* in het universum: het *inflaton*. Het in-

flaton heeft een negatieve druk. In dit proefschrift werken we onder de aanname dat het inflaton niet alleen was, alhoewel het wel de voornaamste component blijft – er waren meerdere soorten materie aanwezig, die ervoor zorgden dat het inflaton een stijve achtergrond ervoer. Als het inflaton interactie heeft met die stijve achtergrond, dan zullen de twee- en drie-punts correlaties van de fluctuaties van de kosmische achtergrondstraling kleine maar bijzondere eigenschappen hebben. Door naar deze specifieke eigenschappen te zoeken in de gegevens van de achtergrondstraling, kunnen we zien of het inflaton bewoog in zo'n stijve achtergrond die niet triviaal is, en kunnen we zelfs de specifieke vorm van deze achtergrond achterhalen.

Omdat zoals eerder gezegd de drie-punts correlatie nog niet is vrijgegeven door de Planckmissie, op het moment van schrijven van dit proefschrift, hebben we in de gegevens van de Planckmissie gezocht naar karakteristieke eigenschappen in de twee-punts correlatie. Nadat we de beste kandidaten voor de twee-punts correlatie hebben gevonden, hebben we de bijbehorende drie-punts correlatie uitgerekend, die we verwachten te kunnen ontdekken in de nieuwe gegevens van Planck zodra die worden vrijgegeven. Deze test voor onze simpele uitbreiding van het simpelste inflatiemodel, staat ons nog te wachten. Bovendien hebben we ons onderzoek uitgebreid naar structuren op grote schaal, die ook informatie over inflatie bevatten, omdat sterrenstelsels en clusters het eindproduct zijn van de primordiale fluctuaties. De gegevens van de structuur op grote schalen bevestigen de beste kandidaten die we vonden in de achtergrondstraling van Planck.

## Part II

Met de ontdekking van het Higgs deeltje in de ATLAS en CMS experimenten van de Large Hadron Collider (LHC) zijn alle belangrijke voorspellingen van het standaardmodel van de deeltjesfysica uitgekomen, en kan het dus als *compleet* worden beschouwd. Er zijn echter een aantal experimentele en theoretische redenen om te proberen het uit te breiden.

Aan de experimentele kant is er al één fenomeen waargenomen dat niet verklaard kan worden met het standaardmodel: *neutrinooscillaties*, dat wil zeggen hoe neutrino's, die voorkomen in drie soorten of generaties, spontaan van de ene generatie in de andere veranderen. Dit is overduidelijk waargenomen, zowel in de stroom van neutrino's die van de zon komen, als in degenen die in deeltjesversnellers gegenereerd worden. Dit gedrag is alleen mogelijk voor deeltjes die massa hebben, terwijl neutrino's volgens het standaardmodel per definitie massaloos zijn. Iedere verklaring voor de massa van neutrino's impliceert dus fysica buiten het standaardmodel.

Donkere materie wordt ook niet verklaard door het standaardmodel. De aanwezigheid van donkere materie is noodzakelijk om de kosmologische en galactische dynamica die we in het heelal waarnemen te verklaren (hetzelfde geldt voor donkere energie, wat hier niet besproken wordt). Desondanks is donkere materie nog nooit direct waargenomen in deeltjesversnellers of sterrenkundige ex-

perimenten. Er is daarom weinig bekend over de *aard van donkere materie* en hoe het in een uitbreiding van het standaardmodel past.

Aan de theoretische kant bestaan verschillende argumenten. Om te beginnen is de massa van het Higgs deeltje, hoewel niet voorspeld door het standaardmodel, verrassend laag. Deeltjes worden zwaarder door de wisselwerking met de deeltjes waar ze aan gekoppeld zijn. Aangezien het Higgs-veld gekoppeld is aan alle fermionen, was de verwachting dat al deze bijdragen tot een veel hogere massa geleid zouden hebben. De verrassend lage massa suggereert het bestaan van een symmetrie die dit tegengaat. Eén mogelijkheid is de introductie van tegenhangers van de deeltjes in het standaardmodel met andere spin maar ongeveer gelijke massa. Het verschil in spin zou automatisch de bijdrage aan de massa van het Higgs deeltje te niet doen. En omdat de massa van de nieuwe deeltjes vrijwel gelijk zou zijn aan de bekende deeltjes, zouden ze mogelijk al binnen een paar jaar waargenomen kunnen worden met de LHC. We noemen deze symmetrie *Super-Symmetrie* (SUSY) en korten het af als MSSM, de *minimaal mogelijke SUSY-uitbreiding van het standaardmodel*.

SUSY heeft een bijkomend gevolg: het hint op de vereniging van alle fundamentele krachten die werken op subatomaire schaal, d.w.z. de *sterke* en *zwakke* kernkracht en de electromagnetische kracht. Dit speculatief fenomeen noemt men de *Grand Unification* en elke theorie die dit in detail beschrijft wordt een *Grand Unification Theory* (GUT) genoemd. GUT's zouden verklaren waarom de *hyperlading*, een van de kwantumgetallen van de deeltjes in het standaard model, in feite gekwantiseerd is. SUSY, gecombineerd met GUT, zou ons ook voorzien van verscheidene kandidaatdeeltjes voor de donkere materie die we (indirect) waarnemen in het universum.

Het MSSM bezit alle bovengenoemde, wenselijke eigenschappen maar tegen de prijs van de introductie van vele nieuwe vrije parameters in het model. Dit maakt het minder voorspelbaar, hetgeen nooit gewenst is voor een fysisch model. Bovendien behandelt het niet de kwantum-aard van de resterende fundamentele interactie: zwaartekracht. Zulke zaken kunnen worden behandeld onder aanname dat het MSSM ingebed is in snaartheorie. De snaartheorie verstrekt ons een goed gedefinieerde beschrijving van kwantumgravitatie. Wanneer de geometrie en enkele eigenschappen van de theorie gekozen zijn kan de gehele fenomenologie op iedere energy schaal, inclusief dat wat we tegenwoordig waarnemen, berekend worden.

Dit is in het bijzonder het geval in de context van dit proefschrift, Heterotische snaren gecompactificeerd in symmetrische toroidale orbifolds; *compactificatie* betekent de aanname dat de extra dimensies eindig en zeer klein zijn in vergelijking met de schaal van standaardmodelnatuurkunde. In deze theorie hoeft men slechts de geometrie van 6 extra dimensies te specificeren, samen met het effect van deze geometrie in de overdragers van de fundamentele interacties (in dat geval, een *rang 16* GUT): is dit gegeven, dan zijn de inhoud en mogelijke interacties van alle fundamentele deeltjes bepaald.

In dit proefschrift voeren wij een classificatie uit van alle mogelijke sym-

metrische toroïdale orbifolds, waarin heterotische snaren kunnen worden gecom-  
pactificeerd. Om dit te bereiken maken we gebruik van hun gelijkenis met de  
kristallografische ruimtengroepen, welke reeds bekend zijn tot op de zesde dimensie  
en wiens aantal gelukkig eindig is. We stellen vast welke van die kristallografische  
groepen de gewenste eigenschappen bezit om het MSSM te beschrijven bij lage  
energieën en berekenen enkele van de relevante eigenschappen die de beschrijving  
van de inhoud en interactie van deeltjes mogelijk maken. Ook relateren wij onze  
classificatie aan vorige, incomplete classificaties uit de literatuur.

